



高职高专“十二五”规划教材



# 自动控制原理

曾爰文 王 编  
郝瑞婷 林月波 副主编



经济科学出版社

高职高专“十二五”规划教材

# 自动控制原理

经济科学出版社

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理 / 曹爱文主编. —北京:经济科学出版社,2010.7  
高职高专“十二五”规划教材  
ISBN 978-7-5058-9638-3

I. ①自… II. ①曹… III. ①自动控制理论—高等学校:技术学校—教材  
IV. ①TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 128889 号

责任编辑:王东萍  
责任校对:徐领柱  
技术编辑:李长建

自动控制原理

曹爱文 主编

郝瑞婷 林月波 副主编

经济科学出版社出版、发行 新华书店经销

社址:北京市海淀区阜成路甲 28 号 邮编:100142

教材编辑中心电话:88191344 发行部电话:88191540

网址:www.esp.com.cn

电子邮件:espbj3@esp.com.cn

北京密兴印刷厂印装

787×1092 16 开 12.75 印张 236 千字

2010 年 7 月第 1 版 2010 年 7 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5058-9638-3 定价:24.90 元

(图书出现印装问题,本社负责调换)

(版权所有 翻印必究)

# 前 言

自动控制原理是自动化学科的重要理论基础,是专门研究有关自动控制系统中基本概念、基本原理和基本方法的一门课程,也是高职院校自动化类专业的一门核心基础理论课程。学好自动控制理论,对掌握自动化技术有着重要作用。

信息技术瞬息万变,高职高专教材应该具有基础性、全面性、系统性、先进性和通俗性等特点,以适应我国高等职业教育的发展,满足高等职业技术教育的需要。由此,作者根据多年的教学和实践经验,并查阅和参考了许多相关的书籍和资料,编写了本书。

本书浅显易懂,选材广泛适当,覆盖面广,推理严谨。全书共安排九章内容,包括自动控制系统简介、拉氏变换、自动控制系统的数学模型、时域分析、根轨迹分析法、频域分析、系统的校正与设计、采样控制系统基础、自动控制原理实验指导。为了便于组织教学和学习,全书每章均设有“本章导读”、“学习目标”,明确教学重点和基本要求;每章结束均设有“本章小结”,便于教学归纳总结与提升理解层次与复习效果。此外,书中安排有相应实例,并将 MATLAB 引入本书,作为补充内容与能力提升的一种手段。同时,为了加深学生对课程内容的理解和掌握,每章均有一定量的习题。本书中习题有两类,其中,题号前加“\*”的为难度较大的题,适合深入学习。

为了配合教学,本书配备了丰富的教学资源,可从经济科学出版社网站 ([www.esp.com.cn](http://www.esp.com.cn)) 下载。

本书在编著过程中,作者力求采用先进的教学思想和教学方法,使学生可以在掌握基本关键点的同时又能对理论有一定了解,方便后续学习,为有志于深入学习的学生留有一定余地。本书将理论与实践相结合,对于培养动手能力同样大有裨益。

本书第 1、3、4、7、8 章由郝瑞婷撰稿,第 2、5、6、9 章由林月波撰稿,全书文稿的整理、修改、定稿由曹爱文完成。

本书可作为高等职业院校、高等专科学校、成人高校、民办高校及本科院校举办的二级职业技术学院的电气与自动控制类、机电类、计算机类、应用电子等专业的教材,也可供相关人员参考。

由于编者水平有限,时间也比较仓促,书中难免存在不足和考虑不周之处,望专家和读者批评指正,在此深表谢意。

编 者

# 目 录

第 1 章 自动控制系统简介 .....	1
1.1 自动控制系统概述 .....	1
1.1.1 历史回顾 .....	1
1.1.2 自动控制系统举例 .....	2
1.1.3 自动控制系统术语 .....	3
1.2 开环控制与闭环控制 .....	4
1.2.1 反馈控制系统 .....	4
1.2.2 开环控制系统 .....	4
1.2.3 闭环控制系统 .....	4
1.2.4 开环与闭环控制系统的对比 .....	5
1.3 自动控制系统的组成与工作原理 .....	5
1.4 自动控制系统的类型 .....	7
1.4.1 按照信号流向进行划分 .....	7
1.4.2 按照输入信号进行划分 .....	7
1.4.3 按照是否与时间相关进行划分 .....	7
1.4.4 按照信号是否为脉冲形式进行划分 .....	8
1.4.5 按照输入输出量的数量进行划分 .....	8
1.5 对自动控制系统的基本要求 .....	8
第 2 章 拉氏变换 .....	10
2.1 复数与复变函数 .....	10
2.1.1 复数与复变函数 .....	10
2.1.2 欧拉公式 .....	11
2.2 拉氏变换的基本定义 .....	12
2.3 常用函数的拉氏变换 .....	12
2.3.1 指数函数的拉氏变换 .....	12
2.3.2 阶跃函数的拉氏变换 .....	12
2.3.3 斜坡函数的拉氏变换 .....	13
2.3.4 正弦、余弦函数的拉氏变换 .....	13
2.3.5 平移函数的拉氏变换 .....	13
2.3.6 脉动函数的拉氏变换 .....	14
2.3.7 脉冲函数的拉氏变换 .....	14
2.4 拉氏变换的其他内容 .....	15
2.4.1 $f(t)$ 与 $e^{-st}$ 相乘 .....	15
2.4.2 时间比例尺定理 .....	15
2.4.3 拉氏积分收敛域 .....	15

2.5	拉氏变换相关定理	16
2.5.1	叠加定理	16
2.5.2	实微分定理	16
2.5.3	实积分定理	17
2.5.4	复微分定理	17
2.5.5	卷积积分定理	17
2.5.6	初值定理	18
2.5.7	终值定理	18
2.5.8	延迟定理	18
2.5.9	复频域的位移定理	19
2.6	拉氏反变换	19
2.6.1	拉氏反变换的定义	19
2.6.2	拉氏反变换	19
2.6.3	部分分式展开法	20
2.7	应用拉氏变换求解微分方程	23
2.8	应用 MATLAB 进行部分分式展开	24
2.8.1	用 MATLAB 进行部分分式展开	24
2.8.2	用 MATLAB 进行拉氏变换与反变换	25
<b>第 3 章</b>	<b>自动控制系统的数学模型</b>	<b>28</b>
3.1	线性自动控制系统的微分方程	29
3.2	微分方程的线性化方法	31
3.3	传递函数与脉冲响应函数	33
3.3.1	传递函数的定义及其说明	34
3.3.2	脉冲响应函数	34
3.4	典型环节的传递函数	35
3.4.1	比例环节的传递函数	35
3.4.2	积分环节的传递函数	35
3.4.3	微分环节的传递函数	36
3.4.4	惯性环节的传递函数	36
3.4.5	一阶微分环节的传递函数	36
3.4.6	振荡环节的传递函数	36
3.4.7	延迟环节的传递函数	37
3.5	方框图	37
3.5.1	方框图的定义	37
3.5.2	方框图的构成	37
3.5.3	环节之间的连接	38
3.5.4	闭环系统的方框图	39
3.5.5	方框图的简化与变换	39
3.6	控制系统的传递函数	41
3.6.1	开环传递函数与前向传递函数	42
3.6.2	闭环传递函数	42

3.6.3 误差传递函数	42
3.7 应用 MATLAB 求解串联、并联与闭环传递函数	43
3.8 建立与化简控制系统数学模型实例	44
<b>第 4 章 时域分析</b>	<b>47</b>
4.1 时域响应	47
4.1.1 时域响应的定义	47
4.1.2 典型试验信号	48
4.1.3 瞬态响应与稳态响应	50
4.2 时域响应的性能指标	50
4.2.1 稳态性能指标	50
4.2.2 动态性能指标	50
4.3 系统的稳定性	51
4.3.1 稳定性的定义	51
4.3.2 绝对稳定性与相对稳定性	51
4.3.3 系统稳定的充要条件	52
4.4 系统稳定性的判定	52
4.4.1 劳斯判据	52
4.4.2 赫尔维茨判据	54
4.4.3 系统参数对稳定性的影响	55
4.4.4 不稳定系统的改进	56
4.5 一阶系统的时域响应	57
4.5.1 单位阶跃响应	57
4.5.2 单位斜坡响应	58
4.5.3 单位脉冲响应	58
4.5.4 线性定常系统的特性	59
4.6 二阶系统的时域响应	59
4.6.1 二阶系统的定义与模型	59
4.6.2 单位阶跃响应	60
4.6.3 二阶系统与瞬态响应指标	62
4.6.4 单位脉冲响应	63
4.7 稳态误差	64
4.7.1 误差与稳态误差	64
4.7.2 系统类型的划分	64
4.7.3 稳态误差分析	64
4.7.4 稳态误差的计算	65
4.7.5 扰动信号作用下的稳态误差	66
4.7.6 提高系统稳态精度的方法	67
4.8 给定信号下的稳态误差与误差系数	67
4.8.1 阶跃输入下的稳态误差与静态位置误差系数 $K_p$	67
4.8.2 斜坡输入下的稳态误差与静态速度误差系数 $K_v$	68
4.8.3 加速度输入下的稳态误差与静态加速度误差系数 $K_a$	68

4.9 应用 MATLAB 和 Simulink 进行瞬态响应分析 .....	69
4.9.1 单位阶跃响应 .....	69
4.9.2 单位斜坡响应 .....	70
4.9.3 单位脉冲响应 .....	71
4.9.4 任意信号下的响应 .....	72
4.9.5 根据传递函数求系统响应 .....	73
4.9.6 阶跃响应的性能指标 .....	73
4.9.7 应用 Simulink 进行建模与仿真 .....	74
<b>第 5 章 根轨迹分析法</b> .....	77
5.1 根轨迹的基本概念 .....	77
5.1.1 根轨迹的定义 .....	77
5.1.2 根轨迹方程与幅角条件和幅值条件 .....	79
5.2 绘制根轨迹图的一般规则 .....	80
5.3 广义根轨迹 .....	88
5.3.1 参数根轨迹 .....	88
5.3.2 零度根轨迹 .....	89
5.4 系统性能分析 .....	91
5.4.1 确定闭环极点 .....	91
5.4.2 应用闭环主导极点估算系统性能指标 .....	93
5.4.3 开环零点对根轨迹的影响 .....	93
5.4.4 开环极点对根轨迹的影响 .....	95
5.5 应用 MATLAB 绘制根轨迹图 .....	96
5.6 根轨迹图绘制实例 .....	97
<b>第 6 章 频域分析</b> .....	101
6.1 频率特性基础 .....	101
6.1.1 频率特性的定义与求取 .....	101
6.1.2 频率特性的几何表示 .....	103
6.2 典型环节的频率特性 .....	105
6.2.1 比例环节的频率特性 .....	105
6.2.2 积分环节的频率特性 .....	105
6.2.3 微分环节的频率特性 .....	106
6.2.4 惯性环节的频率特性 .....	109
6.2.5 振荡环节的频率特性 .....	110
6.2.6 延迟环节的频率特性 .....	111
6.3 开环频率特性 .....	112
6.3.1 开环频率特性的定义 .....	112
6.3.2 绘制系统伯德图 .....	113
6.3.3 绘制系统奈奎斯特图 .....	114
6.3.4 最小相位系统与非最小相位系统 .....	115
6.4 闭环频率特性 .....	119
6.4.1 闭环频率特性的定义 .....	119



6.4.2	等 $M$ 圆 (等幅值轨迹)	119
6.4.3	等 $N$ 圆 (等相角轨迹)	121
6.4.4	应用等 $M$ 圆和等 $N$ 圆求单位反馈系统频率特性	122
6.4.5	应用等 $M$ 圆和等 $N$ 圆求非单位反馈系统的闭环频率特性	122
6.5	频率特性与系统性能的关系	123
6.5.1	开环频率特性与时域响应的关系	124
6.5.2	闭环频域性能指标与时域性能指标的关系	124
6.6	系统稳定性的判定	126
6.6.1	奈奎斯特判据理论基础	126
6.6.2	奈奎斯特判据的应用	129
6.6.3	对数稳定判据	131
6.7	相对稳定性	132
6.7.1	增益裕量 (即幅值裕量)	132
6.7.2	相位裕量 (即相角裕量)	133
6.8	应用 MATLAB 进行频域特性分析	133
6.8.1	伯德图	133
6.8.2	奈奎斯特图	135
<b>第 7 章</b>	<b>系统的校正与设计</b>	<b>138</b>
7.1	系统性能指标	138
7.1.1	时域性能指标	138
7.1.2	频域性能指标	139
7.1.3	综合性能指标	139
7.1.4	性能指标之间的关系	140
7.2	系统校正	140
7.2.1	系统校正的定义	140
7.2.2	系统校正的方式	141
7.3	线性系统基本控制规律 (PID)	142
7.3.1	比例控制 (P)	142
7.3.2	比例-微分控制 (PD)	143
7.3.3	积分控制 (I)	143
7.3.4	比例-积分-微分控制 (PID)	144
7.4	校正装置及其特性与功能	145
7.4.1	超前校正装置	145
7.4.2	滞后校正装置	147
7.4.3	滞后-超前校正装置	148
7.5	用频率法进行系统串联校正	151
7.5.1	超前校正	151
7.5.2	滞后校正	153
7.5.3	滞后-超前校正	155
7.6	应用 MATLAB 和 Simulink 进行线性系统设计	157
7.6.1	超前校正	157

7.6.2	滞后校正 .....	158
7.6.3	用 Simulink 进行线性系统设计与校正 .....	161
<b>第 8 章</b>	<b>采样控制系统基础 .....</b>	<b>164</b>
8.1	初识离散系统 .....	164
8.1.1	数字控制系统 .....	164
8.1.2	计算机控制系统 .....	165
8.2	采样 .....	165
8.2.1	采样过程 .....	165
8.2.2	采样定理 .....	166
8.2.3	采样保持器 .....	168
8.3	Z 变换 .....	170
8.3.1	Z 变换的定义 .....	170
8.3.2	Z 变换的方法 .....	170
8.3.3	Z 变换的性质 .....	171
8.3.4	Z 变换的反变换 .....	172
8.4	脉冲传递函数 .....	173
8.4.1	脉冲传递函数的定义 .....	173
8.4.2	开环系统的脉冲传递函数 .....	174
8.4.3	闭环系统的脉冲传递函数 .....	174
8.5	闭环极点与动态特性的关系 .....	175
8.5.1	实数极点 .....	176
8.5.2	复数极点 .....	176
8.6	系统稳定性分析 .....	177
8.6.1	$z$ 平面内的稳定条件 .....	177
8.6.2	$z$ 平面与 $s$ 平面的对应关系 .....	177
8.6.3	劳斯稳定判据 .....	178
8.6.4	朱利稳定判据 .....	179
8.7	单位输入下的系统稳态误差 .....	180
8.7.1	单位阶跃输入下的稳态误差 .....	180
8.7.2	单位斜坡输入下的稳态误差 .....	180
8.7.3	单位加速度输入下的稳态误差 .....	180
8.8	MATLAB 在采样控制系统中的应用 .....	181
8.8.1	连续系统的离散化 .....	181
8.8.2	求解系统的响应 .....	182
<b>第 9 章</b>	<b>自动控制原理实验指导 .....</b>	<b>184</b>
9.1	模拟典型环节 .....	184
9.2	二阶系统时域响应 .....	187
9.3	三阶系统时域响应 .....	188
9.4	PID 控制器的输出 .....	191
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>194</b>

# 第 1 章

## 自动控制系统简介



### 本章导读

自动控制原理是掌握自动化知识的重要理论基础,专门研究控制系统中的基本概念、基本方法和基本原理。本章主要介绍了开环控制系统和闭环控制系统的特征与区别、自动控制系统的组成和工作原理,以及按照不同的类型对自动控制系统的划分方法。最后提出了性能良好的自动控制系统应具备的基本特征。



### 学习目标

1. 了解自动控制系统类型的划分方法。
2. 理解良好的控制系统应具备的特征。
3. 掌握开环控制系统与闭环控制系统的特征与区别。
4. 掌握自动控制系统的组成及工作原理。

## 1.1 自动控制系统概述

自动控制作为一种重要的技术手段,在工业、农业、交通运输和国防各个方面起着十分重要的作用。自动控制理论的发展与应用,不仅改善了劳动条件,把人类从繁重的劳动中解放出来,而且由于自动控制系统能以某种最佳方式运行,可以提高劳动生产率,提高产品质量,节约能源,降低成本。自动控制作为一门专门学科,得到了迅速的发展和广泛的应用。

### 1.1.1 历史回顾

18世纪(1788年),瓦特(Watt)利用小球离心调速器使蒸汽机转速保持恒定,这是自动控制领域的第一项重大成果。但是瓦特在使用的过程中发现,有时小球离心调速器并不能使蒸汽机很好地调速,并且时常发生剧烈的振荡,也就是说,系统的转速不能稳定下来,这就提出了一个关于控制系统稳定性的问题。

19世纪初期,自动控制理论的应用进展比较缓慢。1868年,麦克斯韦(Maxwell)对轮船的稳定性进行了研究;1877年,麦克斯韦的学生劳斯(Routh)提出了劳斯代数稳定性判据,并





获得了亚当奖；1895年，赫尔维茨(Hurwitz)也提出了本质上与劳斯判据一致的代数稳定性判据，并在稳定性理论的指导下，为瑞士达沃斯电厂的一个蒸汽机设计了一个调速系统。赫尔维茨被认为是真正运用控制理论来指导设计控制系统的第一人。

20世纪初，自动控制理论得到了真正的发展。1932年，奈奎斯特(Nyquist)在研究负反馈放大器时创立了著名的奈氏稳定判据，并提出了稳定裕量的概念；1945年，伯德(Bode)提出用图解法来分析和综合反馈控制系统的方法，形成控制理论的频域法；1950年，伊文斯(Evans)又创立了另一种图解法，即著名的根轨迹法。1954年，中国科学家钱学森全面地归纳总结了经典控制理论，在美国出版了国际上第一本经典控制理论的著作《工程控制论》。

20世纪60年代初，又形成了现代控制理论。以此为核心，对多输入多输出、时变、非线性、高速、高精度、高性能、自适应等控制系统进行研究，在线性控制、最优控制、最佳滤波、动态系统识别、自适应控制等理论方面获得了巨大发展。

目前，控制理论与实践正以“大系统”和“智能”为主题迅猛发展，形成了多个重要分支，包括系统辨识、自适应控制、综合自动化、非线性系统理论、模式识别与人工智能、智能控制等。

### 1.1.2 自动控制系统举例

人们的生活在很大程度上都依赖于自动运行的系统。一个自动运行的系统，就是指它的运行不需要人为的干预。自然界有很多这样的例子。将人体作为一个例子来考虑，这个系统持续地自动控制是人生存的基本要求。考虑令人的体温保持在 $37^{\circ}\text{C}$ 的自动温控系统、心跳控制系统、眼球聚焦系统，从肾脏、肺和肝脏的功能来看，它们也可以称为自动系统。这些系统和其他许多人体内的系统一样都是在没有任何有意干预的情况下自动运行的。实际上，在周围环境中还有许多自动运行的人造系统，日常生活中要接触到或使用其中的许多系统。如在一个现代化的居室内，温度由温度调节装置自动控制，类似的还有水箱中热水的温度。导航控制系统使汽车自动保持在设定车速，刹车防抱死系统自动防止汽车在湿滑的路面上打滑，在大型办公楼或旅馆的电梯调度系统自动发送电梯搭载乘客。以上只是众多的自动运行系统的几个例子，除此之外，每个人都可以举出类似的例子。

什么是自动控制？为了更清楚地说明这一概念，首先看看下面的温度控制实例。

如图1-1所示，在这里人起了控制器的作用，他希望使热水温度保持在给定温度上，为了测量热水的实际温度，在热水的输出管道内安装了一支温度计，温度计测得的温度就是系统的输出量。操纵者始终监视着温度计，当发现温度高于希望值时，就减少输送到系统中的蒸汽量，以降低其温度；当发现温度低于希望的温度时，操纵者就反向操纵蒸汽阀门，使进入系统的蒸汽量增大，以提高这一温度。

这种控制作用，是基于闭环控制原理的。在这个例子中，输出量的反馈(水温)与参考输入量(蒸汽量)的比较以及控制作用，都是通过人来实现的。这就是一种闭环控制系统，这类系统可以叫做人工反馈系统，或叫人工闭环控制系统。

如果用自动控制器来取代人工操作，如图1-2所示，就变成自动控制系统，或叫自动反馈控制系统、自动闭环控制系统。

将自动控制器刻度盘上指针的位置，标定在(转到)希望的温度，例如 $40^{\circ}\text{C}$ 。系统的输出量，即热水的实际温度，由温度测量装置予以测定后，与希望的温度值进行比较，以产生误差信号。为此，在进行比较之前，需通过变送器将输出温度变成与输入量(即给定值，参据量)相同



的物理量(变送器是将信号从一种物理量变换成另一种物理量的装置)。在自动控制器中,产生的误差信号经过放大后,作为控制器的输出量加到控制阀上,从而改变控制阀的开度,使进入系统的蒸汽量发生相应的变化,最后使实际的水温得到校正。如果没有误差信号,当然也就不必改变阀的开度。

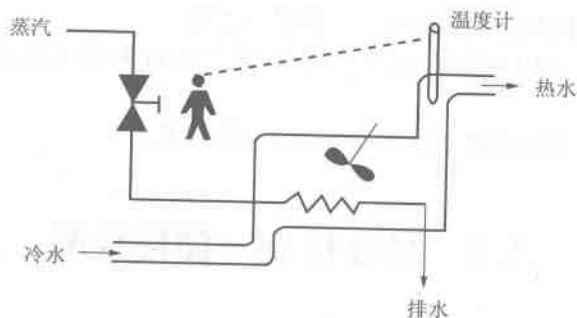


图 1-1 温度人工控制原理图

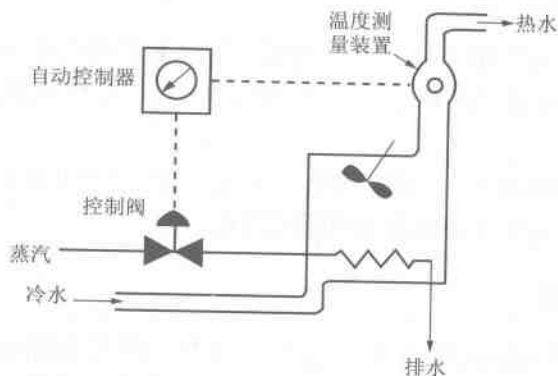


图 1-2 温度自动控制原理图

在上述系统中,环境温度的变化以及输入冷水温度的变化等,都可看作是系统的外部干扰。

人工控制和自动控制的基本原理是相似的。操纵者的眼睛类似于误差测量装置,操作者的头脑类似于自动控制器,而操纵者的肌体则类似于执行机构。它们都是建立在“测量偏差,修正偏差”的基础上,并且为了测量偏差,必须把系统的实际输出反馈到输入端。人工控制和自动控制的区别在于自动控制用控制器代替人完成控制。

然而,在复杂的控制系统中,因为系统中各变量之间存在着错综复杂的关系,所以很难进行人工操纵。应当指出,即使在简单的系统中,采用自动控制器也有利于消除人工操纵造成的误差。如果要求精确控制,就必须采用自动控制系统。

### 1.1.3 自动控制系统术语

控制系统中常用到各种术语,现在将其含义阐述如下:

- (1) **被控对象**——它是控制系统所控制和操纵的对象,它接受控制量并输出被控量。
- (2) **控制器**——外加的设备或装置,用来接收变换和放大的偏差信号,转换为对被控对象进行操作的控制信号。



- (3) 给定信号——控制系统的输入信号,是时间的函数。
- (4) 输出信号——控制系统的输出,即受控的物理量。
- (5) 反馈信号——从系统的输出端引出,经过变换回送到输入端与给定信号进行比较的信号。
- (6) 偏差信号——控制输入信号与主反馈信号之差。
- (7) 扰动信号——破坏系统平衡,导致系统的被控量偏离其给定值的因素,称为扰动信号。
- (8) 误差信号——系统被控量的期望值与实际值之差。

## 1.2 开环控制与闭环控制

### 1.2.1 反馈控制系统

**反馈:**把取出的输出量送回输入端,并与输入信号相比较产生偏差信号的过程,称为反馈。若反馈的信号与输入信号相减,使产生的偏差越来越小,称为**负反馈**;反之,则称为**正反馈**。

**反馈控制:**采用负反馈并利用偏差进行控制的过程,由于引入了被控量的反馈信息,整个控制过程成为闭合的,反馈控制也称为**闭环控制**。

### 1.2.2 开环控制系统

如果系统的输出量与输入量间不存在反馈的通道,这种控制系统称为**开环控制系统**。在开环控制系统中,不需要对输出量进行测量,也不需要将输出量反馈到系统输入端与输入量进行比较,其结构图如图 1-3 所示,如交通指挥的红绿灯转换,自动生产线等。洗衣机就是开环控制系统的典型例子,浸湿、洗涤和漂清过程,在洗衣机中是依次进行的,在洗涤过程中,无需对其输出信号即衣服的清洁程度进行测量。

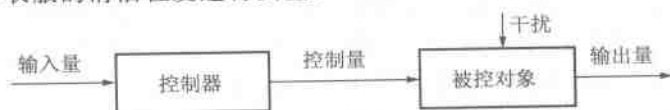


图 1-3 开环控制系统

开环控制是最简单的一种控制方式,但有较大的缺陷,即一旦对象或控制装置受到干扰,或工作中特性参数发生变化,都会直接影响被控量,而且无法自动补偿,因此系统的控制精度难以保证,系统的抗干扰能力比较差。一般仅用于对控制性能要求较低场合,如普通机床的自动加工过程。

### 1.2.3 闭环控制系统

把输出量直接或间接地反馈到系统的输入端,形成闭环,参与控制,这种系统称为**闭环控制系统**。在闭环控制系统中,需对输出量进行测量,其结构图如图 1-4 所示,如小功率随动



系统,雷达控制系统等。显然,闭环系统为反馈系统,据反馈极性的不同,反馈可分为通过反馈使偏差增大的正反馈和通过反馈使偏差减小的负反馈。一般无特殊说明,下面所讲的反馈系统均为负反馈系统。



图 1-4 闭环控制系统

闭环控制系统由于采用了反馈,系统的输出量能够自动地跟踪给定量,减小跟踪误差,提高控制精度,抑制扰动信号的影响。除此之外,负反馈构成的闭环控制系统也有缺点:引进反馈通路后,使得系统对前向通路中元件参数的变化不灵敏,从而系统对于前向通路中元件的精度要求不高;由于闭环控制存在反馈信号,利用偏差进行控制,如果设计不当,将会使系统无法正常或稳定工作。此外,控制系统的精度与系统的稳定性之间也常常存在矛盾。

#### 1.2.4 开环与闭环控制系统的对比

##### 1. 开环控制系统的特点

- (1) 只有正向作用,没有反馈作用;
- (2) 控制精度取决于元器件的精度和系统调整精度;
- (3) 没有抑制内、外干扰的能力;
- (4) 系统结构简单,成本低。

##### 2. 闭环控制系统的特点

- (1) 既有正向作用,也有反馈控制;
- (2) 控制精度与元件精度、控制方法、调整精度有关,控制精度较高;
- (3) 有抑制干扰的能力;
- (4) 结构复杂,成本相对较高。

开环控制系统和闭环控制系统各有优缺点,在实际工程中,应根据具体的工程要求及实际情况来选择合适的系统。如果事先预知输入量的变化规律,又不存在外部和内部参数的变化,并且对控制精度要求不高,则采用开环控制比较好;如果对系统外部干扰无法预测,系统内部参数又时常变化,则采用闭环控制更为合适;如果对系统的性能要求较高时,为了解决闭环控制精度与稳定性之间的矛盾,可以采用开环控制与闭环控制相结合的复合控制系统。

### 1.3 自动控制系统的组成与工作原理

此处以图 1-5 所示的炉温自动控制系统为例,说明自动控制系统的组成与工作原理。

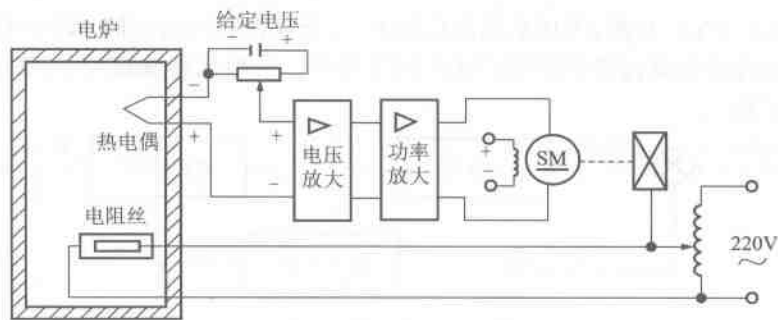


图 1-5 炉温自动控制系统原理图

在研究自动控制系统的工作原理时,为了清楚地表示系统的结构和组成,说明各元器件之间信号传递的因果关系,通常把系统的各个环节用方框图来表示,如图 1-6 所示。

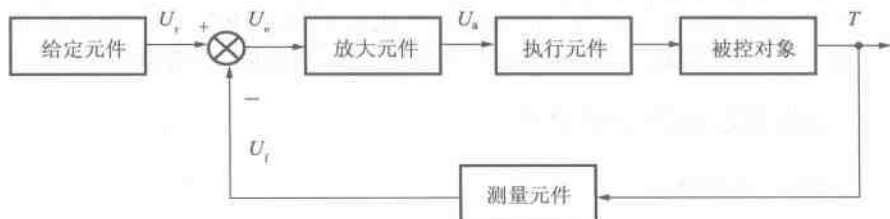


图 1-6 炉温自动控制系统方框图

图中各符号的含义如下:

“⊗”代表比较元件,它将测量元件检测到的被控量与参据量进行比较;

“-”代表两者符号相反,即负反馈;

“+”代表两者符号相同,即正反馈。

信号沿箭头方向从输入端到达输出端的传输通路称**前向通路**;系统输出量经测量元件反馈到输入端的传输通路称**主反馈通路**。前向通路与主反馈通路共同构成**主回路**。

由图 1-6 可以看出,典型的自动控制系统包括以下各组成部分:

(1) **被控对象**——指自动控制系统需要进行控制的机器、设备或生产过程。被控对象要求实现自动控制的物理量称为被控量或输出量。

(2) **测量元件**——其职能是测量被控制的物理量。

(3) **给定元件**——其职能是给出与期望的被控量相对应的系统输入量(即参据量)。

(4) **比较元件**——对系统输出量与输入量进行代数运算并给出偏差信号,起综合、比较变换作用。

(5) **放大元件**——将比较元件给出的偏差进行放大,用来推动执行元件去控制被控对象。

(6) **执行元件**——直接作用于被控对象,使其被控量发生变化的元件称为执行元件。

以图 1-5 所示炉温自动控制系统为例来说明自动控制系统的工作原理。

加热炉采用电加热方式运行,加热器所产生的热量与调压器电压  $U_c$  的平方成正比,  $U_c$  增高,炉温就上升,  $U_c$  的高低由调压器滑动触点的位置所控制,该触点由可逆转的直流电动机驱动。炉子的实际温度用热电偶测量,输出电压  $U_f$ 。  $U_f$  作为系统的反馈电压与给定电压  $U_i$  进行比较,得出偏差电压  $U_e$ ,经电压放大器、功率放大器放大成  $U_a$  后,作为控制电动机的驱动





电压。

在正常情况下,炉温等于某个期望值  $T^{\circ}\text{C}$ ,热电偶的输出电压  $U_t$  (均用标准公式来表示,其他类似)正好等于给定电压  $U_r$ 。此时,  $U_e = U_r - U_t = 0$ ,可逆电动机不转动,调压器的滑动触点停留在某个合适的位置上,使  $U_e$  保持一定的数值。这时,炉子散失的热量正好等于从加热器吸取的热量,形成稳定的热平衡状态,温度保持恒定。

当炉膛温度  $T^{\circ}\text{C}$  由于某种原因突然下降(例如,炉门打开造成的热量流失),则出现如下控制过程:

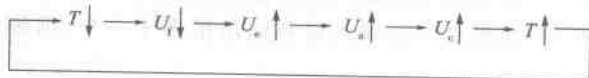


图 1-7 炉温自动控制系统的控制过程

控制的结果是使炉膛温度回升,直至  $T^{\circ}\text{C}$  的实际值等于期望值为止。

由上述分析可知自动控制系统的一般工作原理。采用闭环控制的自动控制系统最突出的优点就是反馈控制可以自动进行补偿。当然,闭环控制除了反馈环节以外还可以增加检测环节、反馈比较环节、调压器等。需要注意的是,这样会使控制系统更加复杂,成本提高,也可能使系统的稳定性变差。

## 1.4 自动控制系统的类型

### 1.4.1 按照信号流向进行划分

开环控制系统——信号由输入端到输出端单向流动。

闭环控制系统——信号除从输入端到输出端外,还有从输出到输入的反馈信号。

### 1.4.2 按照输入信号进行划分

恒值控制系统——系统的输入量是一恒值,并且要求系统的输出量相应地保持恒定。

随动系统——系统的输入量是任意变化的量,并且要求系统的输出量能跟随输入量的变化作出相应的变化。

程序控制系统——系统的输入量不是常值,而是事先确定的程序信号,并且要求被控对象的被控量按照要求的程序变化。

### 1.4.3 按照是否与时间相关进行划分

定常系统——如果描述系统特性的微分方程中各项系数都是与时间无关的常数,则称为定常系统。

时变系统——如果描述系统特性的微分方程中只要有一项系数是时间的函数,则称为时变系统。